



TITLE:

ブラックホール摂動論に基づく重力波の研究

AUTHOR(S):

佐々木, 節

CITATION:

佐々木, 節. ブラックホール摂動論に基づく重力波の研究. 2004

ISSUE DATE:

2004-04

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/84775>

RIGHT:

p.1-139学術雑誌掲載論文の抜き刷り、出版社に著作権許諾が得られていないため未掲載。

ブラックホール摂動論に基づく重力波の研究

(研究課題番号 12640269)

平成 12 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)(2))
研究成果報告書

京 都 大 学 図 書



1040945306

附 属 図 書 館

平成 16 年 4 月

研究代表者 佐々木 節
(京都大学基礎物理学研究所)

はしがき

近年、日本を含む世界各国で大型干渉計による重力波検出器の開発が盛んであり、それらの主要なターゲットは、コンパクト連星系の合体である。また、10年後程度を目途にしたスペース干渉計計画も進められている。これらの重力波検出器の目的は、電磁波の代わりに重力波を使った天文学、すなわち重力波天文学の確立である。しかし、そのためには、検出される重力波から、その源の物理状態が正確に再現されなければならない。

本研究課題では、重力波源として、巨大ブラックホールとコンパクト星の連星系に注目し、ブラックホール摂動論を使って重力波放出の反作用も含めたコンパクト星の軌道進化の計算法を定式化することを目標にした。

なお、本研究は平成12年度から平成15年度にわたる日本学術振興会・科学研究費補助金(基盤研究(C)(2): 課題番号 12640269)により行われた。

研究課題名

ブラックホール摂動論に基づく重力波の研究

研究組織

研究代表者: 佐々木節(京都大学基礎物理学研究所)

研究分担者: 田越秀行(大阪大学大学院理学研究科)

研究経費

平成12年度	1,300千円
平成13年度	1,100千円
平成14年度	800千円
平成15年度	800千円

計 4,000千円

研究発表

[1] 学会誌等

1. "Gauge problem in the gravitational self-force: First post Newtonian force under Regge-Wheeler gauge"
H. Nakano, N. Sago and M. Sasaki
Phys. Rev. D 68, 124003 (2003) [arXiv:gr-qc/0308027]
2. "Analytic black hole perturbation approach to gravitational radiation"
M. Sasaki and H. Tagoshi
Living Rev. Rel. 6, 6 (2003) [arXiv:gr-qc/0306120]
3. "An effective search method for gravitational ringing of black holes"
H. Nakano, H. Takahashi, H. Tagoshi and M. Sasaki
Phys. Rev. D 68, 102003 (2003) [arXiv:gr-qc/0306082]
4. "Coincidence analysis to search for inspiraling compact binaries"
H. Takahashi and H. Tagoshi [LISM Collaboration]
Class. Quant. Grav. 20, S741 (2003) [arXiv:gr-qc/0307002]
To appear in the proceedings of 8th Gravitational Wave Data Analysis Workshop (GW-DAW 2003), Milwaukee, Wisconsin, 17-20 Dec 2003
5. "Relativistic stars with poloidal and toroidal magnetic fields and meridional flow"
K. Ioka and M. Sasaki
Astrophys. J. 600, 296 (2004) [arXiv:astro-ph/0305352]
6. "Grad-Shafranov equation in noncircular stationary axisymmetric spacetimes"
K. Ioka and M. Sasaki
Phys. Rev. D 67, 124026 (2003) [arXiv:gr-qc/0302106]
7. "Gauge problem in the gravitational self-force. I: Harmonic gauge approach in the Schwarzschild background"
N. Sago, H. Nakano and M. Sasaki
Phys. Rev. D 67, 104017 (2003) [arXiv:gr-qc/0208060]

8. "Covariant self-force regularization of a particle orbiting a Schwarzschild black hole:
Mode decomposition regularization"
Y. Mino, H. Nakano and M. Sasaki
Prog. Theor. Phys. 108, 1039 (2003) [arXiv:gr-qc/0111074]
9. "Calculating the gravitational self force in Schwarzschild spacetime"
L. Barack, Y. Mino, H. Nakano, A. Ori and M. Sasaki
Phys. Rev. Lett. 88, 091101 (2002) [arXiv:gr-qc/0111001]
10. "Stable operation of a 300-m laser interferometer with sufficient sensitivity to detect
gravitational-wave events within our Galaxy"
M. Ando *et al.* [TAMA Collaboration]
Phys. Rev. Lett. 86, 3950 (2001) [arXiv:astro-ph/0105473]
11. "Self-force on a scalar charge in circular orbit around a Schwarzschild black hole"
H. Nakano, Y. Mino and M. Sasaki
Prog. Theor. Phys. 106, 339 (2001) [arXiv:gr-qc/0104012]
12. "The first search for gravitational waves from inspiraling compact binaries using
TAMA300 data"
H. Tagoshi *et al.* [TAMA Collaboration]
Phys. Rev. D 63, 062001 (2001) [arXiv:gr-qc/0012010]
13. "Gravitational reaction force on a particle in the Schwarzschild background"
H. Nakano and M. Sasaki
Prog. Theor. Phys. 105, 197 (2001) [arXiv:gr-qc/0010036]

[2] 口頭発表

1. Self-force on a scalar charge in circular orbit around a Schwarzschild black hole
Hiroyuki Nakano, Yasushi Mino and Misao Sasaki,
4th Capra meeting on Radiation Reaction in General Relativity,
May 28 - 31, 2001, AEI, Golm, Germany
2. "Overview and prospects of Mino-Nakano-Sasaki approach" (invited)
Misao Sasaki,
4th Capra meeting on Radiation Reaction in General Relativity,
May 28 - 31, 2001, AEI, Golm, Germany
3. "Gauge problem in the gravitational self-force under Regge-Wheeler gauge"
Hiroyuki Nakano, Norichika Sago and Misao Sasaki
12th Workshop on General Relativity and Gravitation
November 25 - 28, 2002, University of Tokyo, Tokyo, Japan
4. "Coincident analysis to search for inspiralling binaries"
Hideyuki Tagoshi,
7th Gravitational Wave Data Analysis Workshop,
December 17 - 19, 2002, IAS, Kyoto, Japan
5. "Gauge problem in the gravitational self-force"
Hiroyuki Nakano,
6th Capra meeting on Radiation Reaction in General Relativity,
June 23 - 25, 2003, YITP, Kyoto, Japan
6. "Self-force regularization in the black hole perturbation approach" (invited)
Misao Sasaki,
Mathematics of Gravitation II,
September 1 - 9, 2003, Stefan Banach International Mathematical Center, Warsaw,
Poland

研究成果

[1] 概要

本研究では、重力波源として、巨大ブラックホールとコンパクト星の連星系に注目し、ブラックホール摂動論を使って重力波放出の反作用も含めたコンパクト星の軌道進化の計算法を定式化することを目標にした。このアプローチでは、コンパクト星を点粒子近似するため、重力波の反作用力に(物理的でない)発散が生じる。そこでこれを正則化する必要がある。

ブラックホール時空上を運動する粒子の引き起こす重力場が粒子自身に与える自己力は、その発散部分を共変的に引き去った残り、いわゆるテール部分で与えられることが知られていたが、その具体的計算法が分かっていなかった。これに関して、場の粒子軌道付近での解析的性質を利用した「パワー展開正則化」と場の球面調和関数展開を利用した「モード正則化」の方法を提案した。

重力の場合には、単に発散部分を取り去るだけでなく、ゲージの自由度をどう扱うかの問題がある。これを避けるために、まず、ゲージ自由度のないスカラー粒子に対して「パワー展開正則化」を適用して、その有効性を確かめた。また、回転していない球対称(シュバルツシルト)ブラックホールに限った場合には、モード正則化の方法が有効であり、自己力の発散部分は、場がスカラー、ベクトル、テンソルのいずれであるかに係わらず基本的に同じ構造を持つ事を示した。さらに、「モード正則化」の方法によって具体的に引き去られるべき項を一般軌道の場合に明示した。これによって、本来の目標である重力場の自己力の計算に向けての準備がほぼ整った。

次に、重力の場合に現れる、座標ゲージの問題を解く方法として、球対称ブラックホールの場合に関しては、すべての計算を調和ゲージで実行することが可能であることを示した。しかし、この方法は非常に面倒な計算が必要であり、様々な状況への応用を考えるとあまり現実的でない、という欠点があった。そこで、調和ゲージでの計算の複雑さを回避するために、重力的自己力の計算をより便利なゲージで行う方法の開発を進め、球対称ブラックホールの場合に、Regge-Wheelerゲージで解く方法を提案し、実際にポストニュートン展開の低次の項に関して具体的に正則化された力を求めた。この答え自身は、ブラックホール摂動論を使わずに、単純なポストニュートン近似の運動方程式から簡単に求まるものであるが、それを正則化を通して求めることが可能であることを世界で初めて示した点が大きな成果である。

しかし、この方法は、円軌道のように特殊な軌道には有効であるが、それ以外の一般軌道に関しては、各軌道ごとに数値計算を精度よく実行する必要性が生じ、計算コストが非常に

高くなる。これを解消するために、任意の軌道に関して正則化が可能な解析的方法を開発した。これにはポストニュートン展開を必要とするが、最大の利点は、それが解析的であるために、どれほど高い次数が必要であっても、それが有限である限り、一度計算してしまえば、それで済む点である。

現在、どの次数までの展開が必要であるか、いくつかの軌道に関して、簡単のためにスカラー粒子を考えてテスト計算を実行しており、近い将来明確な答えが得られるはずである。

[2] 発表論文

研究成果の詳細は、既に学会誌等に掲載されている論文や投稿中の論文に述べられているので、その主なものをここに収録する。

Gravitational reaction force on a particle in the Schwarzschild background

H. Nakano and M. Sasaki p. 1

Self-force on a scalar charge in circular orbit around a Schwarzschild black hole

H. Nakano, Y. Mino and M. Sasaki p. 23

Calculating the gravitational self force in Schwarzschild spacetime

L. Barack, Y. Mino, H. Nakano, A. Ori and M. Sasaki p. 47

Covariant self-force regularization of a particle orbiting a Schwarzschild black hole: Mode decomposition regularization

Y. Mino, H. Nakano and M. Sasaki p. 51

Gauge problem in the gravitational self-force. I: Harmonic gauge approach in the Schwarzschild background

N. Sago, H. Nakano and M. Sasaki p. 77

Gauge problem in the gravitational self-force: First post-Newtonian force under Regge-Wheeler gauge

H. Nakano, N. Sago and M. Sasaki p. 91

A new analytical method for self-force regularization. I: Scalar charged particle in Schwarzschild spacetime

W. Hikida, S. Jhingan, H. Nakano, N. Sago, M. Sasaki and T. Tanaka p. 123